大規模群杭基礎の動的インピーダンス DYNAMIC IMPEDANCE OF A LARGE SCALE PILE-GROUP

増田 潔*, 三浦賢治**, 喜多村英司***, 宮本裕司****

Kiyoshi MASUDA, Kenji MIURA, Eiji KITAMURA and Yuji MIYAMOTO

This paper describes the practical analysis methods for dynamic impedance of pile-group foundation with a large number of piles. Many methods for this problem have been proposed, but these were for pile-group with a small number of piles. It is impossible to expand these methods to the analysis for pile-group with many piles due to the restriction of computer memory capacity and computation expense. Two practical analysis methods are shown in this paper. The applicability of the methods was examined using the results by rigorous method and the forced vibration test results.

Keywords : pile-group foundation, dynamic impedance function, practical analysis method, forced vibration test, correlation analysis

群杭基礎, 動的インピーダンス, 実用的解析法, 強制加振実験, シミュレーション解析

1. はじめに

杭基礎上に建つ構造物の地震時応答をスウェー・ロッキングモデルで解析する際には杭基礎の動的インピーダンスが必要となる。本論文は、杭本数が非常に多い大規模群杭基礎の動的インピーダンスを解析するための実用的な方法について記述したものである。

杭基礎の地盤との動的相互作用のうち動的インピーダンスに関する研究はおおよそ25年ほど前より着手され¹⁾、今日までに数多くの研究者により解析と実験・観測の両面から遂行された貴重な研究の成果が数多く発表されている^{2)~10)}。しかし、これらの研究のほとんどは単杭あるいは各柱下に基礎フーチングを設け、これを小口径の杭数本で支持する基礎形式あるいは全体で多くとも数十本程度の小規模群杭基礎に関するものである。高層建物は自重が大きく、この自重に耐え得る強固な基礎が必要となる。この基礎が杭基礎として計画される場合には、各柱下に大口径の杭1本が支持杭として設計される場合が多い。さらに、高層建物の平面規模は一般に大きく、現在では数百本に及ぶ大規模群杭基礎も珍しくない。この種の杭基礎においては、建物底面の全面に打設された杭の各々が地震時に相互に影響し合う群杭特有の問題が生じる。数本程度の小規模群杭基礎に関して得られた既往の研究成果を外挿し、数百本に及ぶ大規模群杭基礎

の動特性を把握するには限界があると考えられる。

文献1)~10)における単杭あるいは群杭基礎の解析は弾性波動論に基づくものである。これらの文献で用いられている解析方法を大規模群杭基礎に適用することは、計算機の記憶容量や演算時間の制約により実際上不可能である。これに対し、群杭基礎の動的インピーダンスを解析する簡便で実用的な解析方法として、Dobry¹¹⁾、Gazetas¹²⁾、Makris¹³⁾が提案した方法がある。これは杭からの波動逸散の伝播経路を設定する解析法であり、波動逸散の伝播経路が均質地盤においては比較的簡単に定まることから有効な方法である。しかし、実在の地盤においては均質地盤として取り扱うことのできる地盤はまれである。特に、杭支持構造物が計画・建設される軟弱地盤では、物性値の異なる軟弱な地層が上部に数層あり、その深部に強固な支持層が存在するのが普通である。この種の成層地盤において上記の解析法を適用するためには、便宜的に成層地盤を等価な均質地盤に置換する方法など解決しなければならない問題が多々ある。

本論文は大規模群杭基礎の動的インピーダンスの簡便で実用的な解析法を示し、この解析法の適用性を精度の高い解析法による結果および群杭基礎で実施した強制加振実験の結果を用いて検討したものである。

本論文は文献15)で既に発表した内容に加筆したものである。

* 鹿島, 情報システム部 次長

** 鹿島, 小堀研究室 次長・博士(工学)

*** 鹿島, 情報システム部 主任

**** 鹿島, 小堀研究室 主任研究員・博士(工学)

Information Processing Center, Kajima Corporation

Kobori Research Complex, Kajima Corporation, Dr. Eng.

Information Processing Center, Kajima Corporation

Kobori Research Complex, Kajima Corporation, Dr. Eng.

2. 動的インピーダンスの解析法

本章では、群杭基礎の動的インピーダンス（以後、*DI* と略記する。）の解析法として、解析精度の高い方法とこれを簡便にした方法および杭頭外力の分布を仮定して解析する方法について示す。

2.1 精算法

N 本の杭から成る群杭基礎の各杭を m 個の要素に分割し、各要素間節点に Fig.1 の変位成分を有する変位ベクトル $\{u^J\}$ ：

$$\{u^J\} = \{u_x^J, u_y^J, u_z^J, \phi_x^J, \phi_y^J, \phi_z^J\}^T \quad (1-1)$$

とこの変位ベクトルに対応する節点外力ベクトル $\{f^J\}$ ：

$$\{f^J\} = \{p_x^J, p_y^J, p_z^J, M_x^J, M_y^J, M_z^J\}^T \quad (1-2)$$

を考える。ただし、 $J=1\sim N$ 、 $i=1\sim(m+1)$ であり、上添字 J は杭番号、また i は節点番号であり、 i は杭頭位置を 1 とする。なお、杭軸回りのねじれ角 ϕ_z^J とモーメント M_z^J が群杭の *DI* に及ぼす影響は小さいため、これらは無視する。以下はすべて振動数領域での解析であり、時間頂 $\exp(i\omega t)$ の表示は省略する。 $\{u^J\}$ と $\{f^J\}$ を全杭についてまとめたベクトルをそれぞれ $\{u_P\}$ と $\{f_P\}$ とすると、これらのベクトル間には次の関係がある。

$$[S_P]\{u_P\} = \{f_P\} \quad (2-1)$$

$$[S_P] = [G_{SS}]^{-1} + [S_{PP}] - [S_{SP}] \quad (2-2)$$

ここに、 $[G_{SS}]$ は自由地盤のグリーン関数、 $[S_{PP}]$ は杭体の剛性、 $[S_{SP}]$ は杭位置地盤すなわち土柱の剛性マトリックスである。 $\{u_P\}$ 、 $\{f_P\}$ を杭頭に関する成分 $\{u_{P1}\}$ 、 $\{f_{P1}\}$ とそれ以外の成分 $\{u_{P2}\}$ 、 $\{f_{P2}\}$ とに分けると、(2-1) 式を次式のごとく書き換えることができる。

$$\begin{bmatrix} [S_{P11}] & [S_{P12}] \\ [S_{P21}] & [S_{P22}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_{P1}\} \\ \{u_{P2}\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{f_{P1}\} \\ \{f_{P2}\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

DI の解析時には杭頭外力 $\{f_{P1}\}$ 以外は存在せず、 $\{f_{P2}\}=0$ として (3) 式を解くと $\{f_{P1}\}$ は次式となる。

$$\{f_{P1}\} = [S_H] \cdot \{u_{P1}\} \quad (4-1)$$

$$[S_H] = [S_{P11}] - [S_{P12}] \cdot [S_{P22}]^{-1} \cdot [S_{P21}] \quad (4-2)$$

杭頭上の基礎フーチングを剛体とし、Fig.2 に示す成分を基礎フーチングの変位ベクトル $\{U_F\}$ とする。

$$\{U_F\} = \{U_x, U_y, U_z, \Phi_x, \Phi_y, \Phi_z\}^T \quad (5-1)$$

Fig.1 Elements of Displacement Vector at Pile Nodes

また、この変位ベクトルに対応する基礎フーチングの外力ベクトルを $\{f_F\}$ とする。

$$\{f_F\} = \{F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z\}^T \quad (5-2)$$

この $\{U_F\}$ と $\{u_{P1}\}$ は基礎フーチングの拘束マトリックス $[R]$ を介して、

$$\{u_{P1}\} = [R] \cdot \{U_F\} \quad (6-1)$$

さらに、 $\{f_F\}$ と $\{f_{P1}\}$ 間には

$$\{f_F\} = [R]^T \cdot \{f_{P1}\} \quad (6-2)$$

の関係にある。

(4-1) 式と (6-1) 式を (6-2) 式に代入すると、次式が求まる。

$$\{f_F\} = [K_F] \cdot \{U_F\} \quad (7-1)$$

$$[K_F] = [R]^T \cdot [S_H] \cdot [R] \quad (7-2)$$

ここに、 $[K_F]$ は群杭基礎の *DI* マトリックスである。

上記の解析法は、杭の離散化による誤差を除けば厳密解法であり、以後、この解析法を精算法（図中では、RIGOROUS と記す。）と呼ぶ。

精算法でのマトリックスは、 $[G_{SS}]$ が $5N(m+1)$ 次、 $[S_{P22}]$ が $5Nm$ 次正方マトリックスまた $[R]$ が $(5N, 6)$ 型マトリックスであり、大次数のマトリックスの演算が必要となる。例えば $N=100$ 、 $m=10$ の場合、 $[G_{SS}]$ は 5500 次、 $[S_{P22}]$ が 5000 次正方、 $[R]$ が (500, 6) 型マトリックスとなり、これらのマトリックス演算を行うことは実用上困難である。

2.2 略算法

群杭基礎中の I 杭と J 杭の 2 本杭に関して (2) 式～(4) 式の計算を行うと、2 本杭間の杭頭変位 $\{u_{P1}\}$ と杭頭外力ベクトル $\{f_{P1}\}$ との関係式が (4-1) 式より求まる。この関係を次式で表現する。

$$\begin{Bmatrix} \{u_{P1}^I\} \\ \{u_{P1}^J\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [D^{II}] & [D^{IJ}] \\ [D^{JI}] & [D^{JJ}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{f_{P1}^I\} \\ \{f_{P1}^J\} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

ここに、 I と J はそれぞれ I 杭と J 杭に関係する量であることを示す上添字であり、 $[D^{KL}]$ は L 杭の単位杭頭外力に対する K 杭の杭頭変位マトリックスすなわち杭頭柔性マトリックスである。

(8) 式を群杭基礎中の全ての 2 本杭の組合せについ

Fig.2 Elements of Displacement Vector for Foundation Slab and Pile Head

て計算すると、群杭基礎全体での杭頭変位 $\{u_{pi}\}$ と杭頭外力ベクトル $\{f_{pi}\}$ の関係を次式のごとく表現することができる。

$$\{u_{pi}\} = [D] \cdot \{f_{pi}\} \quad (9-1)$$

$$\{f_{pi}\} = [D]^{-1} \cdot \{u_{pi}\} \quad (9-2)$$

ここに、 $[D]$ は 2 本杭間で求めた杭頭柔性マトリックス $[D^{KL}]$ を群杭基礎全体についてまとめた杭頭柔性マトリックスである。(9-2) 式と精算法の (4-1) 式は同一の関係式であり、 $[D]^{-1}$ を $[S_M]$ と置くことにより、(7-2) 式から群杭基礎の DI マトリックス $[K_P]$ を計算することができる。

上記の方法は 2 本杭間の杭頭柔性マトリックスの重ね合わせにより DI を解析する方法である。この方法は杭頭柔性マトリックスの計算時に 2 本杭以外の杭の影響が考慮されていないことから近似解法である。この近似解法では $[G_{ss}]$ が $10(m+1)$ 次、 $[S_{p22}]$ が $10m$ 次正方マトリックスとなり、精算法におけるマトリックスの次数が大幅に縮小される。さらに、解析する方向を限って、例えば x 軸と z 軸方向に関係する DI を解析する場合には (8) 式の杭頭変位、杭頭外力ベクトルを、

$$\{u_{pi}^j\} = \{u_x^j, \phi_y^j, u_z^j\}^T \quad (10-1)$$

$$\{f_{pi}^j\} = \{p_x^j, M_y^j, p_z^j : p_y^j = M_x^j = 0\}^T \quad (10-2)$$

また、(5) 式の基礎フーチングの変位ベクトル、外力ベクトルを

$$\{U_F\} = \{U_x, \phi_y, U_z\}^T \quad (11-1)$$

$$\{f_F\} = \{F_x, M_y, F_z\}^T \quad (11-2)$$

とすることにより、 $[D]$ を $3N$ 次の正方また $[R]$ を $(3N, 3)$ 型マトリックスとすることができる。この時の DI マトリックスは次式となる。

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ M_y \\ F_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{HH} & K_{HR} & 0 \\ K_{RH} & K_{RR} & 0 \\ 0 & 0 & K_{VV} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_x \\ \phi_y \\ U_z \end{Bmatrix} \quad (12)$$

ここに、 K_{HH}, K_{RR}, K_{VV} はそれぞれ水平、回転、上下の、また $K_{HR} = K_{RH}$ は水平と回転の連成項の DI である。

一方、この解法においては群杭基礎内の杭間距離 s と方位角 θ が異なるすべての 2 本杭の組合せについて杭頭柔性マトリックス $[D^{KL}]$ を計算する必要がある。杭本数が多くなると、この組合せ数も膨大になり、 $[D^{KL}]$ の計算に時間がかかることになる。Fig. 3 において I 杭の杭頭を x 軸方向の単位外力 $p_x^H = 1$ で加振した時の杭間距離 s 、方位角 θ にある J 杭の (10-1) 式に対応する杭頭変位ベクトルを $\{\delta(s, \theta)\}$ ：

$$\{\delta(s, \theta)\} = \{u_x(s, \theta), \phi_y(s, \theta), u_z(s, \theta)\}^T \quad (13)$$

とすると、この変位ベクトルは杭間距離 s が同一で x 軸と y 軸上にある杭の杭頭変位を用いて次式で与えられる。

$$\{\delta(s, \theta)\} = [T] \cdot [T_\theta] \cdot \{\delta(s)\} \quad (14)$$

ここに、

$$\{\delta(s)\} = \{u_x(s, 0), u_x(s, 90), u_z(s, 0), \phi_y(s, 90), \phi_y(s, 0)\}^T \quad (15)$$

また、 $[T]$ は次式の座標変換マトリックスである。

$$[T] = \begin{bmatrix} Co & -Si & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Si & Co \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$(Co = \cos \theta, Si = \sin \theta)$$

さらに、 $[T_\theta]$ は次式のフーリエ級数展開に関するマトリックスである。

$$[T_\theta] = \begin{bmatrix} C^* & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -S^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C^* \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$(C^* = \cos \eta\theta, S^* = -\sin \eta\theta)$$

ただし、 $\eta=1$ である。また、I 杭の y 軸回りモーメント加振 M_y^H 、 z 軸方向加振 p_z^H に関しても同様に (17) 式においてそれぞれ $\eta=1, \eta=0$ とすることにより (14) 式の関係式が成り立つ。

ここで、 $\{\delta(s)\}$ の各要素は杭間距離 s のみの関数であり、任意の 1 要素を $\delta^*(s)$ とおき、これを次式で近似する。

$$\delta^*(s) = \{a/(s+b)\} \cdot \exp[-i(\omega s/v) + c] \quad (18)$$

ここに、 ω は加振円振動数、 v は位相速度、また a, b, c は定数である。次に、杭頭加振杭から距離 s_1 と s_2 にある杭の杭頭変位を、

$$\delta^*(s_1) = A_1 \cdot \exp(i\theta_1) \quad (19-1)$$

$$\delta^*(s_2) = A_2 \cdot \exp(i\theta_2) \quad (19-2)$$

で表す。ここに、 A_j および θ_j は距離 s_j にある杭の杭頭変位の振幅および加振力との位相角である。(19) 式より、(18) 式中の定数 a, b, c は次式のごとく求まる。

$$a = -A_1 \cdot A_2 \cdot (s_2 - s_1) / (A_2 - A_1) \quad (20-1)$$

$$b = (A_1 \cdot s_1 - A_2 \cdot s_2) / (A_2 - A_1) \quad (20-2)$$

$$c = (\theta_2 \cdot s_1 - \theta_1 \cdot s_2) / (s_2 - s_1) \quad (20-3)$$

$$v = -\omega \cdot (s_2 - s_1) / (\theta_2 - \theta_1) \quad (20-4)$$

Fig. 3 Fourier Series Expansion of Displacement Vectors at Pile Heads.

ここで、位相速度 v は受振杭の剛性と質量が影響するために加振杭からの地盤への逸散波の位相速度とは異なる。(19) 式の杭頭変位を算定する杭は、加振杭からの距離が $s_i = s_{\min} + (i-1)(1/4)\lambda$ ($i=1, 2, \dots$, $s_{\min}$: 最小杭間隔, λ : 地盤系における最小横波速度層の横波の波長) にある杭とし, s_i と s_{i+1} 位置の杭の変位を用いて (20) 式から定数を決め, s_i と s_{i+1} の間にある杭の杭頭変位は (18) 式より算定する。以後、上記の解析法を略算法 (図中では, APPROX. と記す。) と呼ぶ。

2.3 応力加振法

基礎フーチングの加振力に対応する杭頭外力の分布を付録に示す一様と剛版分布に仮定して、この杭頭外力による杭頭変位の平均値を基礎フーチングの変位とすることにより、群杭基礎の DI を近似的に算定することができる。例えば、基礎フーチングの水平加振 (F_x) の場合には水平杭頭外力 p_x^j : $j=1 \sim N$ の分布を仮定し、(10) 式において $p_z^j = M_y^j = 0$ また $\phi_y^j = 0$ と置くと (9-1) 式より杭頭水平変位 u_x^j が求まる。同様に、回転と上下加振の場合は上下杭頭外力 p_z^j の分布を仮定して杭頭上下変位 u_z^j を計算する。基礎フーチングの変位はこれらの杭頭変位のエネルギー平均として、水平変位 U_x , 回転角 ϕ_y および上下変位 U_z を求め、杭頭外力の総和から基礎フーチングに作用する水平 F_x , 回転モーメント M_y および上下外力 F_z を算定することにより、 DI を次式で求める。

$$K_{HH} = F_x / U_x \quad \dots\dots\dots (21-1)$$

$$K_{RR} = M_y / \phi_y \quad \dots\dots\dots (21-2)$$

$$K_{VV} = F_z / U_z \quad \dots\dots\dots (21-3)$$

ここに、

$$U_x = \sum_{j=1}^N p_x^j \cdot u_x^j / \sum_{j=1}^N p_x^j \quad \dots\dots\dots (21-4)$$

$$\phi_y = \sum_{j=1}^N p_z^j \cdot u_z^j / \sum_{j=1}^N p_z^j \cdot x_j \quad \dots\dots\dots (21-5)$$

$$U_z = \sum_{j=1}^N p_z^j \cdot u_z^j / \sum_{j=1}^N p_z^j \quad \dots\dots\dots (21-6)$$

$$F_x = \sum_{j=1}^N p_x^j \quad \dots\dots\dots (21-7)$$

$$M_y = \sum_{j=1}^N p_z^j \cdot x_j \quad \dots\dots\dots (21-8)$$

$$F_z = \sum_{j=1}^N p_z^j \quad \dots\dots\dots (21-9)$$

ただし、 x_j は群杭の中立軸から杭までの距離である。以後、上記の解析法を応力加振法と呼ぶ。なお、応力加振法では、(12) 式の DI マトリックスのうち連成項 $K_{HH} = K_{RH}$ を算定することはできない。

3. 動的インピーダンス

前章で示した3種類の解析法で DI を解析し、これらの解析法の特徴と適用性について調べる。

Fig. 4 Soil Conditions

Fig. 5 Pile Arrangement

3.1 解析条件

DI の解析は、Fig. 4 に横波速度 V_s , 単位体積重量 γ , ポアソン比 ν , 減衰定数 h を示す均質地盤 (S-1 SOIL) と支持層を有する3層の成層地盤 (S-2 SOIL) の2種類の地盤に、Fig. 5 に諸元を示す軸径1mで杭長21mの杭が正方格子状に配列された群杭基礎を対象にして行う。

3.2 略算法の検討

Fig. 6 は加振杭から s_1 と s_2 の距離にある杭間の杭頭変位の位相速度 v を $s_2 - s_1 = 2.5$ m として (20-4) 式から計算した結果である。 x 軸方向加振力 (p_x) 時の同軸上にある杭の杭頭変位 ($u_x(s, 0)$) の位相速度は、地表面層の横波速度 V_s ($=100$ m/sec.) とこの層の縦波速度 V_p ($=510$ m/sec.) の間にあり、位相速度が速くなる位置がある。均質地盤においては $s=40$ m と 85 m 付近で位相速度が速くなる位置があるが、これは縦波の波長 L_p ($=V_p/f=510/3=170$ m) の $1/4$ 波長 (42.5 m) の奇数倍距離に関係し、加振杭から発した縦波が加振杭の振動と逆位相となる位置に相当する。成層地盤においては下部層の影響を受け、位相速度の速くなる位置が遠くなる。 p_x 加振時における加振方向直交 y 軸上の杭の杭頭変位 ($u_x(s, 90)$) の位相速度はほぼ最小横波速度であり、成層地盤の方が位相速度が均質地盤に比べ若干速くなっている。上下加振力 (p_z) 時の杭頭上下変位

Fig. 6 Phase Velocity of Two Pile System : $f=3.0$ Hz

($u_z(s,0)=u_z(s,90)$) の位相速度は、均質地盤では横波速度より若干遅く、成層地盤では第2層 ($V_s=200$ m/sec.) と支持層 ($V_s=300$ m/sec.) の横波速度の間の値になっている。

Fig. 7 と Fig. 8 は、杭頭変位を (18) 式の近似式で計算した結果 (APPROX.) と精算法 (RIGOROUS) のそれとの比較を示す。加振方向および地盤種別によらず、両者は良く一致しており、略算法での杭頭変位の近

Fig. 7 Approximation of Displacement Vectors at Pile Heads : S-1 SOIL, $f=3.0$ Hz

似が妥当であることが分かる。

Fig. 9 と Fig. 10 は、 $4(2 \times 2)$, $16(4 \times 4)$, $36(6 \times 6)$ 本群杭基礎の水平 K_{HH} と回転 K_{RR} の DI に関する精算法と略算法との比較を示す。略算法の DI は実部、虚部とも精算法に比べ小さくなる傾向にある。これは略算法では2本杭間の杭頭柔性を重ね合わせて DI を計算しており、この際に他の杭の影響が考慮されていないことによる。さらに杭本数が多い $64(8 \times 8)$ 本群杭基礎の DI に関する精算法と略算法との比較を Fig. 11 と Fig. 12 に示す。連成項 K_{HR} 以外の DI に関しては略算法と精算法との上記の差異の傾向は杭本数が増加してもほぼ同じである。略算法の連成項 K_{HR} の実部は精算法に比べ過少評価になっている。同図の解析に要した略算法の演算時間は、精算法のそれの約 $1/20$ である。これ以上の本数の群杭基礎の DI を精算法により解析することは計算機の制約により不可能であり、杭本数がさらに増えた場合の略算法と精算法との差異の傾向は、連成項 K_{HR} を除き変わらないものと考えられる。

Fig. 11 と Fig. 12 に示した DI の精算法と略算法との差異が、この群杭基礎上にある建物の地震時応答特性に及ぼす影響について調べる。建物は階高 3 m の 10 階建て鉄筋コンクリート造を想定し、基礎は平面が 20 m $\times$ 20 m で $64(8 \times 8)$ 本の群杭とする。建物モデルは基礎フーチングを含め 11 質点とし、基礎フーチング下端に群杭基礎の DI (K_{HH} , K_{HR} , K_{RR}) を付けたスウェイ・ロッキングモデルを解析に用いる。上部階の質点重量 480 t、基礎フーチング重量 800 t また回転慣性は基礎フーチン

Fig. 8 Approximation of Displacement Vectors at Pile Heads : S-2 SOIL, $f=3.0$ Hz

(a) $N=4(2 \times 2)$

(b) $N=16(4 \times 4)$

(c) $N=36(6 \times 6)$

Fig. 9 Dynamic Impedance of 4(2×2), 16(4×4) and 36(6×6) Pile Group : S-1 SOIL, $s/D=2.5$

(a) $N=4(2 \times 2)$

(b) $N=16(4 \times 4)$

(c) $N=36(6 \times 6)$

Fig. 10 Dynamic Impedance of 4(2×2), 16(4×4) and 36(6×6) Pile Group : S-2 SOIL, $s/D=2.5$

Fig. 11 Dynamic Impedance of 64(8×8), Pile Group : S-1 SOIL, $s/D=2.5$

Fig. 12 Dynamic Impedance of 64(8×8), Pile Group : S-2 SOIL, $s/D=2.5$

グ下端に集約して $6.07 \times 10^5 \text{ tm}^2$ とする。各階を結ぶせん断ばねの剛性は、線形に変化するものとして基礎固定時の1次周期 T_1 が $T_1 = 0.02 H$ (H : 軒高) $= 0.02 \times 30$

$m = 0.6$ 秒となるように定め、最上階で $1.89 \times 10^5 \text{ t/m}$ 、最下層でその1.4倍とする。減衰はせん断ばねが3%の減衰定数を有する複素ばねとして評価する。Fig. 13

Fig. 13 Frequency Response Curves for 10-Stories Building on 64(8×8) Pile Group

は水平方向地震入力時の建物頂部と地表面間の伝達関数を示す。精算法と略算法の DI を用いた建物頂部の伝達関数には有意な差異は認められず、建物の地震時応答特性は略算法の DI を用いることにより工学的に十分な精度で把握できる。

3.3 応力加振法の検討

杭頭外力の分布を剛版 (R) と同様 (U) 分布として応力加振法で計算した 400 本 (20×20) 群杭基礎の DI を略算法と比較して Fig. 14 に示す。地盤種別によらず、低振動数領域での応力加振法による DI は、略算法に比べ剛版、一様分布の順に若干小さく評価されている。応力加振法においては、杭頭変位が基礎フーチングにより拘束される効果が考慮されていないことにより、 DI が高振動数領域において波打つ特性が現れる。しかし、低振動数領域での群杭基礎の DI が必要となる固有振動数が非常に低い高層建物の地震応答解析には、応力加振法は十分に適用できる。

3.4 群杭係数

群杭と単杭の DI の実部の静的値すなわち静的剛性について次式の比を取り、これらの比を群杭係数 β と定義する。この群杭係数と杭本数 N との関係について調べる。

$$\text{水平: } \beta_{HH} = \kappa_{HH} / (N \cdot \kappa_{HH}^{(S)}) \quad (22-1)$$

$$\text{回転: } \beta_{RR} = \kappa_{RR} / \left(N \cdot \kappa_{RR}^{(S)} + \kappa_{VV}^{(S)} \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 \right) \quad (22-2)$$

$$\text{上下: } \beta_{VV} = \kappa_{VV} / (N \cdot \kappa_{VV}^{(S)}) \quad (22-3)$$

ここに、 κ_{HH} , κ_{RR} , κ_{VV} はそれぞれ水平、回転、上下の DI の実部の静的値 (計算では 0.1 Hz の値を用いる。) であり、上添字 (s) は単杭に関する量である。Fig. 15 は

Fig. 14 Dynamic Impedance of 400(20×20) Pile Group: $s/D=2.5$

(U: Uniform, R: Rigid Pile Head Force Distribution)

Fig. 15 Efficiency of Pile Group on Static Impedance

均質地盤 (S-1 SOIL) と成層地盤 (S-2 SOIL) に関する群杭係数を示す。これらの図中には通常よく用いられる群杭係数 β と杭本数 N との関係式 $\beta = N^{-0.5}$ および計算結果を式 $\beta = \alpha N^{-\alpha}$ に回帰した曲線を示す。均質地盤における杭間距離 s と杭径 D との比すなわち杭間隔比 s/D が 2.5 の水平の群杭係数 β_{HH} は $\beta = N^{-0.5}$ の曲線に良く対応しているが、回転 β_{RR} は大きく、逆に上下 β_{VV} は若干小さくなっている。杭間隔比が群杭係数に及ぼす影響は β_{RR} に関してはほとんど認められず、 β_{HH} と β_{VV} に若干見られるのみである。成層地盤における各方向の群杭係数は、 $\beta = N^{-0.5}$ より大きくなり、また均質地盤に比べ杭間隔比の影響が顕著である。群杭係数を用いて単杭の静的剛性 $\kappa^{(s)}$ から群杭の静的剛性を評価する場合には、均質地盤に近い地盤系における水平と上下の静的剛性には群杭係数の関係式 $\beta = N^{-0.5}$ をおおむね適用できるが、回転および成層地盤においてこの式を用いると群杭の静的剛性を過小評価することになる。

4. 強制加振実験結果との比較・検討

前章で記述した群杭の DI の解析は、単純な層構成の地盤に関するものである。実在の群杭基礎は層構成がさらに複雑な地盤に建設され、基礎部は地下室あるいは基礎フーチングにより埋込みを有する。ここでは、群杭基礎で実施した強制加振実験結果との比較・検討により略算法と応力加振法の適用性を調べる。

検討の対象とした群杭基礎は Fig. 16 に示す基礎 A と基礎 B である。基礎 A は平面が約 51 m × 26 m で埋込み深さ 6.5 m の鉄筋コンクリート基礎である。杭は杭長 12.5 m の場所打ちコンクリート杭で、軸径 1.5 m の杭 69 本と軸径 1.1 m の杭 15 本の合計 84 本の杭からなる群杭基礎である。1 階床スラブのコンクリートが打設・

硬化した後に同床に起振機を設置して水平方向加振実験を実施した。基礎 B は平面が約 54 m × 51 m で埋込み深さ 11.9 m の鉄筋コンクリート基礎である。杭は杭長 31.1 m、軸径 0.8 m の鋼管杭 492 本の群杭基礎である。床付けレベルが GL-11.9 m で 4.4 m 厚の基礎フーチングのコンクリートが打設・硬化した後に、この基礎フーチング上に起振機を設置して水平方向加振実験を実施した。両基礎での実験は加振力レベルは低く、線形の範囲での強制加振実験である。計測は水平と上下の変位計を基礎各部に配置して行った。計測された上下変位には基礎の回転による上下変位の他に基礎の面外弾性変形による変位が含まれていることが確認されたが、ここでの計測結果の整理は基礎が剛体振動している仮定の基に、全計測点の変位を用いた最小 2 乗法により基礎底面中心位置での加振方向変位 U_0 と直交軸回り回転角 ϕ_0 を算出した。したがって、面外弾性変形を無視した剛体基礎として回転角 ϕ_0 を算出しているために、算出された回転角には誤差が含まれているものと考えられる。

解析は、杭頭位置を地表面として略算法と剛版分布の応力加振法で算定した群杭基礎の DI と文献 14) による単位深さ当たりの基礎埋込み部側面水平ばね $K_{H(S)}$ を考慮して行った。剛体に仮定した基礎の底面での並進力 F 、モーメント M と水平変位 U_0 、回転角 ϕ_0 とは次の関係にある。

$$F = (K_{HH} + E \cdot K_{H(S)})U_0 + |K_{HR} + (E^2/2)K_{H(S)}|\phi_0 \quad (23-1)$$

$$M = |K_{HR} + (E^2/2)K_{H(S)}|U_0 + |K_{RR} + (E^3/3)K_{H(S)}|\phi_0 \quad (23-2)$$

ここに、 E は基礎の埋込み深さ (基礎 A : 6.5 m, 基礎 B : 4.4 m) である。解析は剛体基礎が (23) 式の力-変位関係にある動的ばねで支持されたスウェイ・ロッキ

Fig. 16 Pile Group Foundations

Fig. 17 Dynamic Impedance for Foundation-A in X-Direction Excitation

Fig. 18 Dynamic Impedance for Foundation-B in Y-Direction Excitation

Fig. 19 Resonance and Phase-Lag Curves for Foundation-A in X-Direction Excitation

Fig. 20 Resonance and Phase-Lag Curves for Foundation-B in Y-Direction Excitation

ングモデルで実験をシミュレーションすることにより行った。実験および解析の DI は、加振力と基礎の慣性力から基礎底面での並進力 F 、モーメント M を計算し、次式により求めた。

$$K_H = F / U_0 \quad (24-1)$$

$$K_R = M / \phi_0 \quad (24-2)$$

ここに、 K_H と K_R は水平と回転の DI であり、基礎の埋込みの影響と群杭基礎の DI の連成項 K_{HR} をも含む量である。なお、応力加振法では連成項 K_{HR} は算定されず、この項は考慮されていない。

略算法 (APPROX.) による水平と回転の DI を実験値 (TEST) と比較して Fig. 17 と Fig. 18 に示す。同図には、基礎の埋込みを考慮しない、すなわち (23) 式で $K_{HS} = 0$ とした場合 (Unembedded) の DI も示している。基礎Bの回転 K_R を除いた略算法の DI の実部、虚部は共に実験値に比べ若干小さく評価しているが、 DI の持つ振動数特性を良く捕らえている。埋込みを考慮することにより略算法の DI は当然のことながら実験値との対応が良くなる。この傾向は DI の虚部において著しい。

略算法 (APPROX.) と応力加振法 (R) での DI を用いて計算した共振・位相曲線を実験値と比較して Fig. 19 と Fig. 20 に示す。両基礎の実験値の共振曲線には振幅が盛り上がる振動数が現れているが、これらの振動数での位相が90度付近にないことから基礎-地盤系の固有振動数に伴う共振ピークとは判断できず、基礎の弾性変形などの他の原因により生じたものである。両基礎での水平変位の共振・位相曲線に関する略算法と応力加振法との差異は僅少であり、実験値とおおむね対応している。回転角の共振・位相曲線に関しては、基礎Aの振幅は略算法の方が大きく、逆に基礎Bでは高振動数域で応力加振法の方が大きくなっている。基礎Aでは、実験値の回転角の共振・位相曲線の振動数特性を略算法と応力加振法はおおむね捕らえている。基礎Bでの回転の DI と回転角の共振・位相曲線は、他のものに比べ実験値と解析値との対応が良くない結果となっているが、これは基礎Bの基礎フーチング厚が4.4 mと薄く、かつ平面が基礎Aに比べ大きいことにより、基礎の面外弾性変形の影響を基礎Aに比べ強く受けたことによる。

5. むすび

本論文は、杭本数の非常に多い大規模群杭基礎の動的インピーダンス (DI) の簡便で実用的な解析法としての略算法と応力加振法を示し、精度の高い解析法 (精算法) による結果および群杭基礎の強制加振実験結果との比較・検討により両解析法の適用性を調べたものである。その結果、次のことが分かった。

- 1) 略算法での DI は精算法に比べ若干小さくなるが、その差異は杭支持構造物の地震応答解析を行う上で支障のない程度である。
- 2) 略算法と精算法の演算時間の比は、例えば 64 本群杭基礎で約 $1/20$ となり、略算法により演算時間が大幅に短縮する。
- 3) 均質地盤における群杭基礎の水平と上下の静的剛性の評価には、通常用いられている群杭係数式 $\beta = N^{-0.5}$ (N : 杭本数) がおおむね適用できるが、回転および成層地盤についてこの式を用いると静的剛性が過小に評価される。
- 4) 応力加振法での DI は基礎フーチングの拘束効果が考慮されていないことにより高振動数領域で波打つ特性が現れる。低振動数領域での DI は、略算法に比べ若干小さくなるが実用上問題のない程度である。
- 5) 群杭基礎での強制加振実験結果を略算法および応力加振法での DI を用いてシミュレーション解析した結果、解析結果は実験結果に良く対応しており、両方法の適用性が確認できた。

謝 辞

本研究にあたり御指導下さいました京都大学名誉教授、鹿島建設株式会社・最高技術顧問、小堀鐸二博士に、また研究の遂行時に貴重な御意見、御協力の下さった鹿島建設株式会社の関係各位に感謝の意を表します。

Appendix

杭頭外力分布について

辺長が $2a$ の正方形基礎フーチングを有する群杭基礎の中立軸を x, y 軸とし、1 杭の杭頭座標値を (x_i, y_i) とする。この杭の基礎の水平 F_x , 上下 F_z , モーメント M_y 加振時の杭頭外力 (p_x^i, p_z^i, p_y^i) 分布は次式による。

・一様分布

$$F_x \text{ 加振時: } p_x^i = 1$$

$$F_z \text{ 加振時: } p_z^i = 1$$

$$M_y \text{ 加振時: } p_y^i = x_i$$

・剛版分布

$$F_x \text{ 加振時: } p_x^i = 1/f(a, x_i, y_i)$$

$$F_z \text{ 加振時: } p_z^i = 1/f(a, x_i, y_i)$$

$$M_y \text{ 加振時: } p_y^i = x_i/f(a, x_i, y_i)$$

ここに、

$$f(a, x_i, y_i) = \sqrt{L^2 - (x_i^2 + y_i^2)}$$

$$L = a/\cos\{\tan^{-1}(y_i/x_i)\}$$

参考文献

- 1) Tajimi H.: "Dynamic Analysis of a Structure Embedded

in an Elastic Stratum", Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering, pp.54~69, 1969

- 2) Kobori T., R. Minai and K. Baba: "Dynamic Behavior of a Laterally Loaded Pile", Proceedings of the Specialty Session 10, Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.175~180, 1977
- 3) Novak M. and F. Aboul-Ella: "Impedance Functions of Piles in Layered Media", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.104, EM3, pp.643~661, 1978
- 4) Nogami T.: "Dynamic Group Effect of Multiple Piles under Vertical Vibration", Proceedings of Engineering Mechanics Division, Specialty Conference, ASCE, pp.750~754, 1979
- 5) Kaynia A.M.: "Dynamic Stiffness and Seismic Response of Pile Groups", PH.D. Thesis submitted to the Department of Civil Engineering, M.I.T., 1982
- 6) Davies T.G., R. Sen and P.K. Banerjee: "Dynamic Behavior of Pile Groups in Inhomogeneous Soil", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, No.12, pp.1365~1379, 1985
- 7) 長谷川正幸: "点加振 3 次元薄層法による群杭基礎の動的解析", 第 7 回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.979~984, 1986
- 8) Urao K., K. Masuda, E. Kitamura et al.: "Forced Vibration Test and its Analytical Study for Embedded Foundation Supported by Pile Group", Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. III, pp.673~678, 1988
- 9) 土方勝一郎, 三浦賢治, 宮本裕司ほか 1 名: "群杭基礎の振動特性に関する研究", 日本建築学会構造系論文報告集, 第 408 号, pp.89~98, 1990
- 10) 野添久視, 日下部馨, 福住忠裕: "単杭の鉛直・水平振動特性の一簡易評価法", 日本建築学会構造系論文報告集, 第 438 号, pp.49~64, 1992
- 11) Dobry R. and G. Gazetas: "Simple Method for Dynamic Stiffness and Damping of Floating Pile Groups", Geotechnique, 36, pp.557~574, 1988
- 12) Gazetas G. and N. Makris: "Dynamic Pile-Soil-Pile Interaction. Part 1: Analysis of Axial Vibration", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.20, pp.115~132, 1991
- 13) Makris N. and G. Gazetas: "Dynamic Pile-Soil-Pile Interaction. Part 2: Lateral and Seismic Response", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.21, pp.145~162, 1992
- 14) 田治見宏, 泉川正裕: "埋め込み基礎の側面地盤剛性について", 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp.591~592, 昭和 61 年 8 月
- 15) 喜多村英司, 三浦賢治, 増田 潔, 宮本裕司ほか 1 名: "大規模群杭の動的インピーダンス, (その 1)~(その 3)", 1992 年 8 月, pp.585~590, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸)

(1992 年 10 月 9 日原稿受理, 1993 年 2 月 2 日採用決定)